



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

FUENTE DIGITAL DE ALTO VOLTAJE, BASADO EN
EMBOBINADO DE IGNICIÓN Y SISTEMA
COCKROFT-WALTON

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Licenciado en Electrónica

PRESENTA:

Juan Francisco Verdugo Arredondo

DIRECTOR:

Carlos Duarte Galván
Christian Valerio Lizárraga

Culiacán, Sinaloa, 2017

*A mis padres, Martha Aidé Arredondo Solís y Francisco Verdugo Fierro. A mis
hermanos Dulce Esmeralda Verdugo Arredondo y Néstor Javier Espino Arredondo.
Por ayudarme a crecer en cada aspecto de mi vida.
Yo.*

Reconocimientos

También quiero agradecer a mis grandes maestros que me enseñaron que la sabiduría se encuentra en la motivación y el trabajo duro, Carlos Duarte Galvan, Cristian Valerio, Dr. Millan, etc..

A mi Universidad y sus instituciones, por abrirme las puertas a esta gran casa de estudio, al parque de innovación tecnológico, por haberme formado de la mejor manera posible y por la infinidad de oportunidades que se abren tras el conocimiento que se me ha otorgado. Sin mas ¡gracias!

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Juan Francisco Verdugo Arredondo. Culiacán, Sinaloa, 2017

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Resumen	1
1.1. Antecedentes y justificación	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Hipótesis y objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivo Particular	4
1.3.3. Hipótesis	5
1.4. Estructura de la tesis	5
2. Marco teórico	7
2.1. Calculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos	7
2.2. Fuente de voltaje lineal	11
2.2.1. Etapa de transformador monofasico	11
2.2.2. Rectificador monofasico de onda completa	13
2.2.3. Filtros	13
2.2.4. Regulador	15
2.3. Inversores de voltaje	16
2.3.1. Parametros de desempeño de un inversor	16
2.4. Fuentes de alto voltaje mas comunes	17
2.5. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton	17
3. Metodología	21
3.1. Diseño del hardware	21
3.1.1. Hardware de interface	22
3.1.2. Hardware de fuente de voltaje 180w	23
3.2. Firmware	27
3.2.1. Interface gráfica	27

ÍNDICE GENERAL

4. Análisis de Resultados	41
4.1. Resultados	41
5. Conclusiones	43
Bibliografía	45

Índice de figuras

2.1. Calculo de ancho de pistas 1	9
2.2. Calculo de ancho de pistas 1	10
2.3. Estructura fuente lineal	11
2.4. Principio de funcionamiento de un transformador monofásico.	12
2.5. Simbología de un transformador monofásico.	12
2.6. Simbología de un transformador monofásico.	13
2.7. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de dc y de rizo.	14
2.8. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de dc y de rizo.	14
2.9. Circuito en cascada Cockroft-walton de media onda.	18
2.10. Reproducción del voltaje V_o y el rizo δV en la carga del circuito.	18
3.1. Topologia de fuente de alto voltaje	22
3.2. LCD-TFT para interface gráfica	23
3.3. Topologia de fuente de alto voltaje	24
3.4. Simulación en LTSPICE fuente 180w	25
3.5. Topologia de fuente de alto voltaje	26
3.6. Pantalla 1	29
3.7. Pantalla 2	32

Índice de tablas

Capítulo 1

Resumen

El trabajo de esta tesis consiste en el desarrollo de una fuente de alto voltaje de bajo ruido para su uso en equipo científico de alta precisión, mediante la utilización de un sistema de inversor de voltaje y un rectificador del tipo multiplicador, Cockcroft–Walton, así como también la introducción a un control del sistema con lazo cerrado e interfaces gráficas para el usuario.

Durante el desarrollo del sistema de alto voltaje se realizó el diseño, la simulación, la fabricación y la validación de los datos proporcionados por el sistema.

Obteniendo como resultado un sistema de bajo costo, el cual puede generar alto voltaje a 10w de potencia, obteniendo una comparación entre fuentes de alto voltaje comerciales implementadas en aceleradores de partículas y reactores nucleares de baja potencia.

Como resultado de esta tesis se muestra una comparación entre el diseño realizado y una fuente de alto voltaje comercial de la marca “CAEN” las cuales han sido sometidas a cargas similares a las utilizadas en laboratorios alrededor del mundo.

1.1. Antecedentes y justificación

Uno de los mayores avances tecnológicos de la humanidad ha sido el desarrollo de aceleradores de partículas, ya que tienen grandes aplicaciones en las áreas médicas, militares y alimentarias. Podemos hacer referencia, en medicina, a un echo actual, el veinte por ciento de los fármacos radiactivos que se inyectan en los pacientes son producidos en aceleradores del tipo sincrotrón (1). Los cuales aceleran los protones típicamente a energías de 40 MeV. Estos aceleradores son diseñados para funcionar de manera confiable produciendo haces de alta intensidad con un mínimo de intervención humana, he allí la meta en esta tesis.

En el pasado la radio terapia utilizaba agujas de radio o rayos gamma de cobalto radioactivo, la desventaja de este tipo de maquinaria es que tienen que tener un funcionamiento ininterrumpido, y con el pasar del tiempo su energía decae y es necesario cambiar la fuente radioactiva y resguardarla del medio ambiente, la cual representa un peligro para la humanidad y un problema sin solución actual, ya que la contaminación es latente.

Otro de los tantos ejemplos de las aplicaciones de estas tecnologías es en la rama de la fusión nuclear, ya que estas requieren fuentes de alto voltaje para su funcionamiento, en Mexico existe desarrollo en esta área. En la parte experimental, en 1978 se inició un proyecto mexicano de fusión termonuclear y, en 1983, se propuso el diseño de una pequeña máquina experimental llamada “Novillo”. Este Tokamak fue diseñado y construido por trabajadores mexicanos del ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) en el Centro Nuclear de Salazar, México. El trabajo con este acelerador, permitirá que el país se incorpore a una de las áreas de investigación en Física de Plasmas más prometedoras para el futuro energético. La infraestructura existente y la experiencia adquirida, permitirán contribuir al desarrollo de una futura aplicación de la energía nuclear de fusión, la cual será una fuente alterna de energía en el presente siglo. La continuación de investigaciones en fusion permitira a Mexico, el ingreso a programas del Organismo Internacional de Energía Atómica(2).

Bajo la premisa de la ventaja del desarrollo tecnológico de los aceleradores de partículas para nuestro país, es necesario comenzar los estudios en estos temas, ya que las posibilidades de aplicación son bastas y de suma importancia. Con el pasar del tiempo las aplicaciones han aumentado considerablemente, desde ramas de la medicina como ya lo mencionamos, hasta sistemas de aislamiento por campo magnético de plasmas y sistemas para aumentar temperaturas hasta puntos de fusión para sistemas de generación de energía en plantas de fusión nuclear, los mexicanos han apostado por la participación en el desarrollo de estas tecnologías.

Este trabajo de tesis pretende dar un pequeño acercamiento a temas relacionados con los ya antes mencionados, mediante el desarrollo de la instrumentación de una

fuentes de alto voltaje para un acelerador de electrones lineal, el cual se divide en varias etapas de desarrollo, la primera es el sistema de fuentes, nos basaremos en el desarrollo hecho por Cockcroft-Walton (CW) (1932) combinado con un inversor de voltaje a alta frecuencia incidente en un embobinado de ignición controlado digital mente mediante un microcontrolador a lazo cerrado, el cual cuenta con una comunicación PC-HPS (HIGH POWER SUPPLY), permitiendo al usuario, mediante una retroalimentación, configurar la fuente de voltaje a los parámetros deseados, así como también guardar un registro en las variaciones de corriente y voltaje a la que nuestra fuente es sometida.

1.2. Planteamiento del problema

Hoy en día el desarrollo de tecnologías que involucran aceleradores de partículas esta cada vez mas presentes en la vida diaria, en México ya existe participación en desarrollo de gran nivel, como lo es el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) y distintos laboratorios de gran importancia en nuestro país, lo cual brinda la posibilidad a los investigadores de involucrarse en este tipo de desarrollo para poder satisfacer las necesidades que se requieren.

El uso de aceleradores de partículas para aplicaciones medicas ha tenido gran auge en los últimos años, ya que las ventajas que tienen sobre las fuentes radioactivas son bastas, este echo da la oportunidad a las universidades de preparar expertos en estos temas y diseñar maquinaria a medida, que cumpla las exigencias de la región. Aunque ya existen trabajos referentes a fuentes de alto voltaje, generación de electrones mediante telurio y detectores de estos mismos, la curva de aprendizaje necesaria para especializarse en estos temas es grande y dejar un precedente en nuestro país es necesaria y muy útil, es por ello que estas investigaciones son de gran importancia.

1.3. Hipótesis y objetivos

1.3.1. Objetivo General

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar una fuente de alto voltaje de hasta 2 KV y 10 W de potencia.

1.3.2. Objetivo Particular

- Desarrollo de fuente estable de alto voltaje.
 - Diseño de fuente de voltaje a 12V, 180W y bajo ruido.
 - Simulación de fuente de voltaje a 12V.
 - Construcción de fuente de voltaje 12V.
 - Diseño de driver modulador de ancho de pulso (PWM) bipolar para inversor.
 - Simulación de driver generador de PWM bipolar
 - Construcción de driver (PWM) bipolar.
 - Diseño de interfaces gráficas para control de inversor
 - Mediciones y comparaciones entre fuentes comerciales.
 - Análisis de costos

1.3.3. Hipótesis

El diseño adecuando de un sistema de generación de alto voltaje nos permite llevar acabo experimentos y de alta precisión, con el cual se podrá desarrollar tecnología aplicada en esta área.

1.4. Estructura de la tesis

Este trabajo está dividido en XX capítulos. Al principio se encuentra el desarrollo de un trabajo de tal cosa xx este es un ejemplo.

Finalmente se encuentra la parte de... vamos a seguir con mas comentarios, la parte del comentario comentario comentario nuevo, este sera el tercer comentario de prueba.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Cálculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos

Antes de comenzar con la fabricación de un diseño de PCBs se debe de considerar el tamaño de pistas necesarios para el manejo de corrientes para cada circuito desarrollado, por esa razón mediante un análisis se debe avanzar en el diseño.

En la actualidad los desarrolladores llevan a reducir el ancho de las pistas y espacios, debido a que se desarrollan componentes cada vez más pequeños y sistemas igualmente más compactos, esto obliga a adaptarse a estos nuevos requerimientos.

Para encontrar una solución a esta eventualidad es necesario recurrir a estudios en estos temas que nos permita acercarnos al límite y para ello debemos de considerar todos los parámetros que influyan en nuestro sistema, obteniendo así resultados más precisos. En nuestro caso nos basaremos en los gráficos publicados en el IPC2152 (3) “Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design” en 2009, este estándar es ampliamente utilizado en muchos proyectos que requieran este tipo de análisis.

Para el correcto entendimiento de los procesos que influyen en las pistas por el paso de la corriente debemos de recordar que el paso de la corriente por un conductor produce en este una caída de potencial que esta gobernada por la ley de OHM ($R=V/I$), esta caída de potencial se disipa en forma de calor por el efecto Joule $Q = I^2 R t$. En nuestro el conductor es nuestra pista, su resistencia depende de varios factores, pero lo principal es su sección (ancho x espesor) y su longitud. El efecto térmico es en realidad el que nos interesa conocer al momento del dimensionamiento de la PCB. Por esta razón, para poder calcular una capacidad de transporte de corriente, hay que analizarlo en términos de incremento de temperatura. Fijando como un incremento maxico admisible.

2. MARCO TEÓRICO

Existen algunos parámetros que se deben de considerar importantes de conocer, ya que los mismos alteran o modifican el comportamiento termico de la pista, afectando de manera significativa, los mas importantes son:

- Corriente eléctrica que circula.
- Tipo de material base.
- Calculo de corriente de pistas.
- Sección de la pista.
- Espesor del laminado de cobre.
- Espesor de la placa.
- Presencia de planos de tierra o grandes áreas de cobre.
- Ambiente de aplicación (gabinete, forzadores de aire, vacío, etc.)

Considerar todos estos parámetros en un modelo es bastante complicado, tanto que, en sí, el estándar fue fijado por medio de ensayos y presentando los resultados en forma de curvas. Mediante estos datos empíricos se hace una aproximación que se acerque al límite que deseamos, tomando en cuenta que es importante sobredimensionar dichos límites.

El cálculo que se realiza se basa en el fijado de una variación máxima de temperaturas admisibles. La variación térmica se define como un aumento de temperatura por encima de la temperatura inicial que experimenta el conductor.

Para el cálculo se requieren los gráficos ya antes mencionados que son dos. El primer grafico es una de las tres entradas y se trata de una serie de curvas que corresponden a los incrementos de temperatura desde diez a cien grados centígrados. En el eje de las ordenadas se grafica la corriente máxima en amperes y en el de las abscisas obtenemos la sección de la pista en milésimas de pulgada cuadrada. El segundo grafico tiene de igual manera tres entradas y en esta se centra en el espesor del cobre, adoptando los valores típicos en los que se fabrican las PCBs, llegando desde 0.5 hasta 3 Oz/ft².

Los cálculos necesarios son sencillos y claros de realizar, para ello necesitaremos los siguientes datos:

- Corriente máxima a soportar.
- Incremento máximo de temperatura admisible.

2.1 Cálculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos

- Espesor de cobre del material utilizado.

Utilizando el valor de corriente nos ubicamos en la figura 2.1 por el eje de las ordenadas y proyectamos el valor en forma paralela al eje de las abscisas hasta interceptar la curva que corresponde a la temperatura máxima admisible, luego en la figura 2.2 tomamos el punto en las ordenadas hasta obtener el valor de las abscisas que le corresponde. Ese valor es el valor de la sección cuadrada que debe de tener la pista.

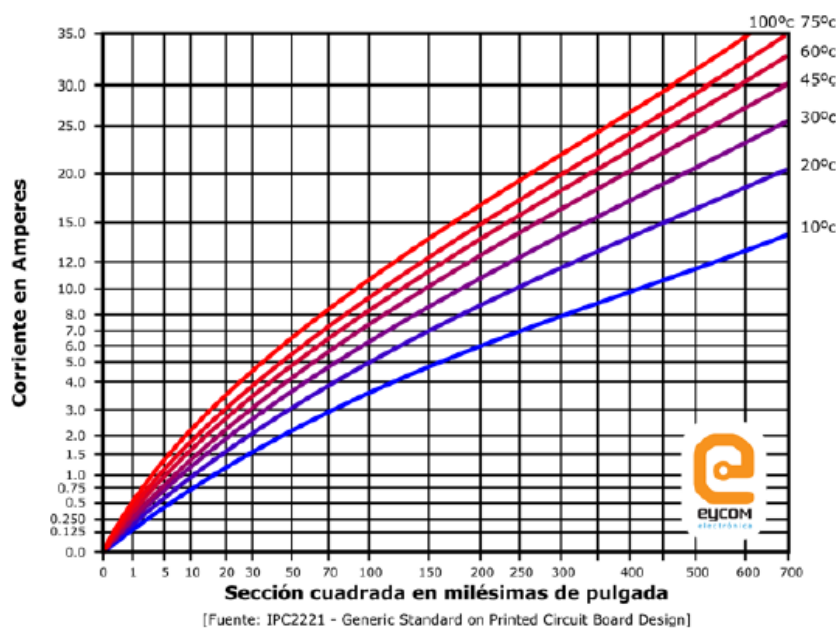


Figura 2.1: Cálculo de ancho de pistas 1

2. MARCO TEÓRICO

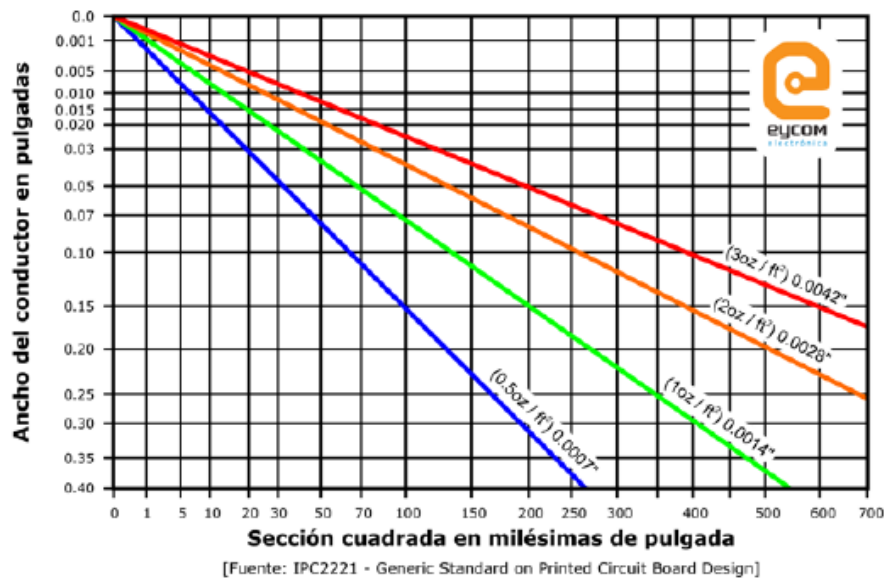


Figura 2.2: Calculo de ancho de pistas 1

2.2. Fuente de voltaje lineal

Es común en proyectos de electrónica no especializados la utilización de diferentes tipos de fuentes de voltaje, entre las que se encuentran fuentes lineales, conmutadas, boost o tipo buck y los problemas que puede causar la falta de atención en este punto tan crucial puede afectar los resultados finales de un proyecto. Es por ello que se necesita conocer los principios fundamentales que reinan a este tipo de sistemas que gobernarán el comportamiento de nuestro proyecto al nivel más básico.

La fuente de voltaje lineal consiste en un sistema sencillo y estructurado, el cual se diseña en diferentes configuraciones en cada módulo a partir del tipo de carga que requiere el proyecto. Para ello podemos observar en la figura 2.5 de manera ilustrativa el orden de la estructura básica de una fuente lineal.



Figura 2.3: Estructura fuente lineal

De manera independiente podemos analizar cada aspecto presentado en la imagen, el cual, de uno en uno se va realizando un análisis para definir los valores y topologías que satisfacen las necesidades requeridas. Tomando en cuenta lo mencionado podemos comenzar a definir las ecuaciones y modelos existentes.

2.2.1. Etapa de transformador monofásico

Esta etapa consta básicamente de un transformador que está formado por un bobinado primario y uno o varios bobinados secundario, que tiene como función principal convertir la energía eléctrica alterna de la red, en energía alterna de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Además provee una aislación galvánica entre la entrada y la salida.

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados, de corriente alterna enrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario tiene N_2 espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero silicio apiladas y aisladas entre sí. De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

2. MARCO TEÓRICO

Al inducir una corriente sobre cualquiera de los dos devanados se genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético se describe mediante la Ley de Faraday y produce una fuerza electromotriz que da lugar a una tensión V_2 en los bornes de dicho devanado.

Normalmente, para un transformador reductor o un transformador elevador tienen dos devanados que se denominan de alta tensión y de baja tensión, siendo bobina primaria y bobina secundaria respectivamente. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado A.T. y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de B.T. y actuar como un transformador elevador.

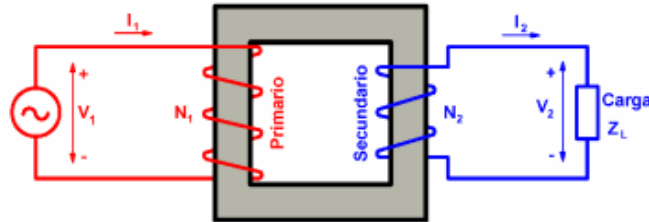


Figura 2.4: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico.

En la figura 2.5 podemos observar los símbolos mas comunes que representan al transformador.

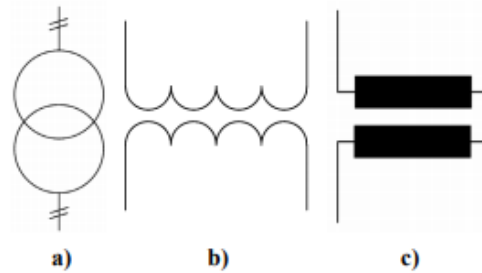


Figura 2.5: Simbología de un transformador monofásico.

Ahora podemos definir los valores asignados o nominales para el diseño de un transformador.

Las **tensiones asignadas o nominales** (V_1 , V_2) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador, estas tensiones son proporcionales al numero de espiras (N_1, N_2) de cada devanado.

La **potencia asignada o nominal** (S_N) la cual permite un funcionamiento sin calentamientos peligrosos en su funcionamiento normal. Cabe mencionar que los dos

devanados siempre tendrán la misma potencia asignada.

Las **corrientes nominales o asignadas** (I_{1N}, I_{2N}) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} * I_{1N} = V_{2N} * I_{2N} \quad (2.1)$$

La **relación de transformación** (m) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (2.2)$$

Estudiando superficialmente los aspectos de construcción de un transformador, mediante estas ecuaciones podemos comenzar con la construcción y diseño. Debemos de considerar las potencias necesarias para nuestro proyecto y mediante ellas calcular el ancho del cobre y el tamaño del entre-hierro.(4)

2.2.2. Rectificador monofasico de onda completa

El circuito rectificador de onda completa enera una señal de corriente directa (D.C.) a partir de una señal de corriente alterna (A.C.) con todos los semiciclos de la señal, invirtiendo todos los semiciclos de una misma polaridad, para convertirlos a la otra.

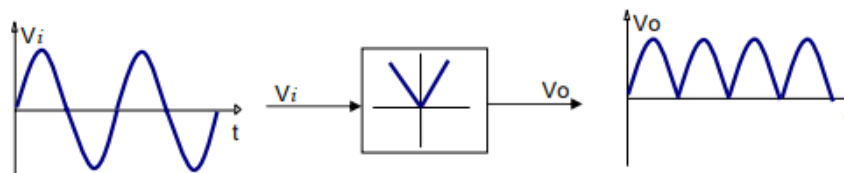


Figura 2.6: Simbología de un transformador monofásico.

Para calcular el voltaje de D.C. que obtendremos podemos utilizar la siguiente ecuación(5)

$$V_{cd} = 2 * 0.636V_m \quad (2.3)$$

2.2.3. Filtros

El voltaje de CA por lo general se conecta a un transformador, el cual lo reduce al nivel de salida de DC deseado. Un rectificador de diodos proporciona entonces un voltaje rectificado de onda completa, el cual en principio se pasa por un filtro de capacitor sencillo para producir un voltaje de DC. El cual en todos los casos presenta un voltaje

2. MARCO TEÓRICO

de rizo o variación de voltaje de CA.

Para calcular el voltaje de rizo podemos utilizar un multímetro con capacidad de medir voltaje en CA (TRUE RMS) y el voltaje de DC. El voltímetro de cd leerá solo el nivel promedio. El medidor de ca (RMS) leerá solo el valor RMS del componente de ca del voltaje de salida. Entonces, definimos el rizo como:

$$r = \frac{\text{voltaje de rizo (rms)}}{\text{voltaje de DC}} = V_{cd} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

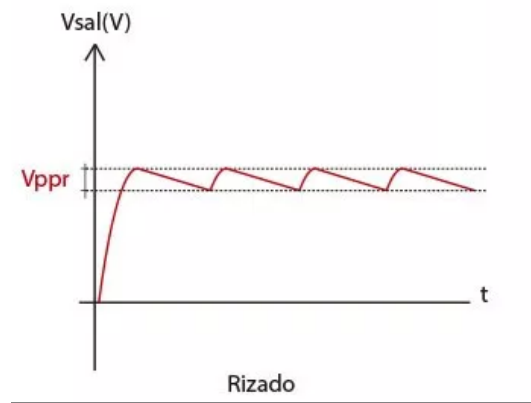


Figura 2.7: Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de dc y de rizo.

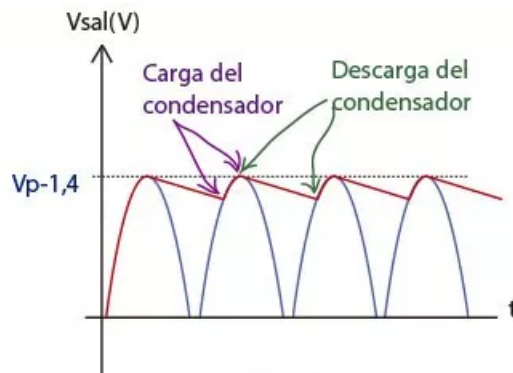


Figura 2.8: Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de dc y de rizo.

Para nuestro caso utilizaremos un filtro de capacitor. Se conecta un capacitor en la salida del rectificador y se obtiene un voltaje de dc a través del capacitor como se muestra en la figura 2.7 y 2.8. Podemos calcular el **voltaje del rizo** que obtendremos mediante la ecuación:

$$V_r(rms) = \frac{I_{cd}}{4\sqrt{3}fC} = \frac{2.4V_{cd}}{R_L C} \quad (2.5)$$

Con la ecuación 2.4 podemos intuir y definir la expresion para el **rizo** de la forma de onda de salida de un rectificador de onda completa y el circuito de capacitor de filtrado:

$$r = \frac{V_r I_{cd}}{C V_{cd}} * 100 \% = \frac{2.4}{R_L C} \quad (2.6)$$

2.2.4. Regulador

Un factor de importancia en una fuente de alimentación es la cantidad de cambios de voltaje de salida de cd a lo largo de la operación de un circuito. El voltaje provisto a la salida en la condición sin carga (sin que demande corriente de la fuente) se reduce cuando se extrae corriente de carga de la fuente. La cantidad que el voltaje de DC cambia entre las condiciones sin carga y con carga la describe un factor llamado regulación de voltaje, para una fuente ideal la regulación de voltaje seria del 0 %. Entonces podemos definir la regulacion de voltaje como:

$$\begin{aligned} \text{Regulación de voltaje} &= \frac{\text{Voltaje sin carga} - \text{Voltaje con carga}}{\text{voltaje con carga}} \\ \%V.R. &= \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} * 100 \% \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.3. Inversores de voltaje

Los convertidores DC a AC se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de DC a un voltaje simétrico de salida de AC de magnitud y frecuencia deseada. Los inversores se pueden clasificar ampliamente en dos tipos: inversores monofasicos e inversores trifasicos. Cada tipo puede usar dispositivos de encendido y apagado controlados, por ejemplo transistor de unión bipolar (BJT), transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), etc. Por lo general estos inversores utilizan señales de control de PWM para producir un voltaje de salida de CA.

Existen diferentes tipos de inversores, un inversor se conoce como inversor alimentado por voltaje (VFI) si el voltaje de entrada permanece constante; inversor alimentado por corriente (CFI) si el voltaje de entrada permanece constante, e inversor enlazado en cd variable si el voltaje de entrada es controlable. Si al voltaje o a la corriente de salida del inversor se le hace pasar a través de cero al crear un circuito LC resonante, a este tipo de inversores se le conoce como inversor de pulso resonante, y tiene vastas aplicaciones en la electrónica de potencia.

2.3.1. Parametros de desempeño de un inversor

El voltaje de entrada a un inversor es de DC y el voltaje de salida de AC. Idealmente la salida debe de ser una onda sinusoidal pura, pero contiene armónicos o rizados como se muestra en la figura 2.7. El inversor consume corriente de la fuente de entrada de DC solo cuando se conecta la carga al sistema, afectando la calidad de la señal de salida, es por ello que una medición variara conforme se conecte una carga diferente. Por lo común la calidad de un inversor se evalúa en función de los siguientes parámetros de desempeño:

La potencia de salida esta dada por

$$P_{ca} = I_0 V_0 \cos \theta \quad (2.8)$$

$$= I_0^2 R \quad (2.9)$$

Donde V_0 e I_0 son el voltaje y corriente rms de la carga, θ es en angulo de la impedancia de la carga y R es la resistencia de la carga.

La potencia de entrada de ca del inversor es:

$$P_S = I_S V_S \quad (2.10)$$

donde V_S e I_S son el voltaje y la corriente promedio de entrada.

El contenido de rizo rms de la corriente de entrada es:

$$I_R = \sqrt{I_I^2 - I_S^2} \quad (2.11)$$

donde I_I e I_S son los valores rms y promedio de la corriente de suministro de cd. El factor de rizo de la corriente de entrada es:

$$RF_s = \frac{I_r}{I_s} \quad (2.12)$$

La eficiencia de potencia, la cual es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada, dependerá de las pérdidas por conmutación, que a su vez dependen de la frecuencia de conmutación del inversor.

Factor armónico del n-ésimo armónico (HF_n). El factor armónico (del n-ésimo armónico) que mide la contribución armónica individual, se define como

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}}, \text{ para } n > 1 \quad (2.13)$$

donde V_{O1} es el valor rms del componente fundamental y V_{ob} es el valor rms del n-ésimo componente armónico.

Distorsión armónica total (THD). La distorsión armónica total, que mide la cercanía en cuanto a forma de onda y su componente fundamental, se define como:

$$THD = \frac{1}{V_{O1}} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2 \right) \quad (2.14)$$

Factor de distorsión (DF).

2.4. Fuentes de alto voltaje mas comunes

2.5. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton

Cockcroft-Walton es un multiplicador de voltaje desarrollado para fines nucleares (6). Este generador consiste en un arreglo en cascada de diodos y capacitores para generar alto voltaje en corriente directa (CD) mediante una entrada de voltaje en corriente alterna (CA). El sistema Cockcroft-Walton es usado principalmente en aceleradores de partículas, pero también en sistemas láser, tubos CRT, LCDs, fuentes de voltaje y sistemas de rayos X. Podemos observar el sistema en cuestión en la figura 1.

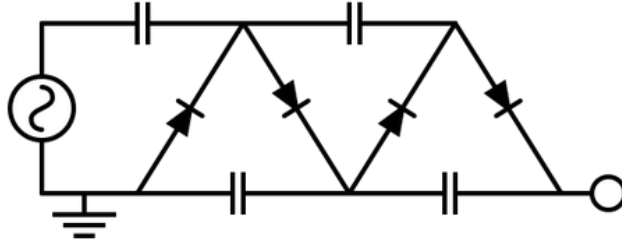


Figura 2.9: Circuito en cascada Cockroft-walton de media onda.

El sistema multiplicador es bastante sencillo pero existen algunos temas imprescindibles los cuales tenemos que estudiar a profundidad, ya que el funcionamiento fundamental de un capacitor es la carga y descarga del mismo, es por ello que los parámetros del componente deben de ser calculados metódicamente.

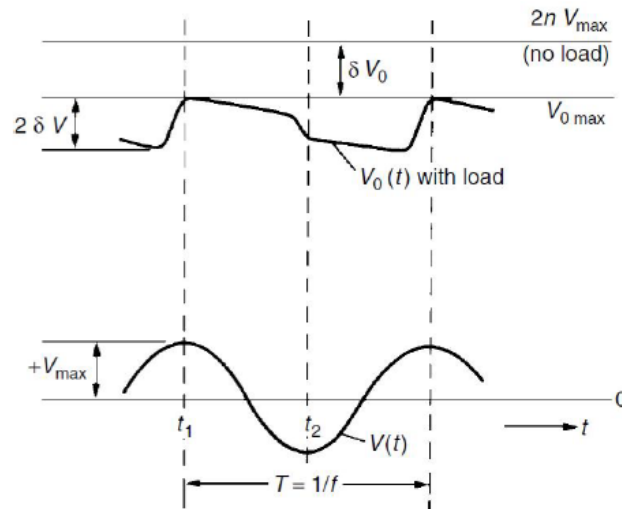


Figura 2.10: Reproducción del voltaje V_o y el rizo δV en la carga del circuito.

$$\delta V = \frac{i}{fC} \frac{n(n+1)}{4} \quad (2.15)$$

$$V \approx 2nV - \frac{2n^3}{3fC} \quad (2.16)$$

Es por ello que mediante un análisis matemático debemos de hacer el calculo de la respectiva δ del mismo.

No solamente la calidad de la salida depende de lo antes mencionado, ya que, para un

correcto funcionamiento necesitamos realizar un sistema de entrada estable y constante. De aquí el siguiente estudio.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se expone todo el desarrollo de la fuente de alto voltaje en cuestión; diseño del sistema, fabricación del sistema, diseño del firmware del micro controlador, implementación y por último el método experimental.

El sistema esta compuesto por dos partes, hardware y firmware, el hardware se compone de tres partes como vemos en la figura 3.1: parte digital de control, inversor de voltaje y rectificador multiplicador.

Por otro lado el firmware consiste en los programas que realizan el control completo de la generación de alto voltaje por medio del desarrollo de un ambiente gráfico al que el usuario tiene acceso, control para el senseo de voltajes, corrientes y protecciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema en general, así como también un control para el inversor de voltaje, mediante la implementación de un ADC (Analog to Digital Converter) a la salida de una devanado de baja en el transformador de alto voltaje el cual controla la salida de alto voltaje. Observemos de manera gráfica la topología del sistema en la figura 3.1.

3.1. Diseño del hardware

La figura 3.1 muestra un diagrama a bloques de la estructura general del hardware que conforma el sistema de generación de alto voltaje, el cual esta compuesto, desde la parte superior a la inferior, primeramente por bloques relacionados con el control digital del sistema, este bloque se encarga de las interfaces para el usuario así como también de el control e instrumentación de los diferentes sensores, el siguiente conjunto de bloques representan la electrónica encargada de la inversión de voltaje y por ultimo tenemos la rectificación.

3. METODOLOGÍA

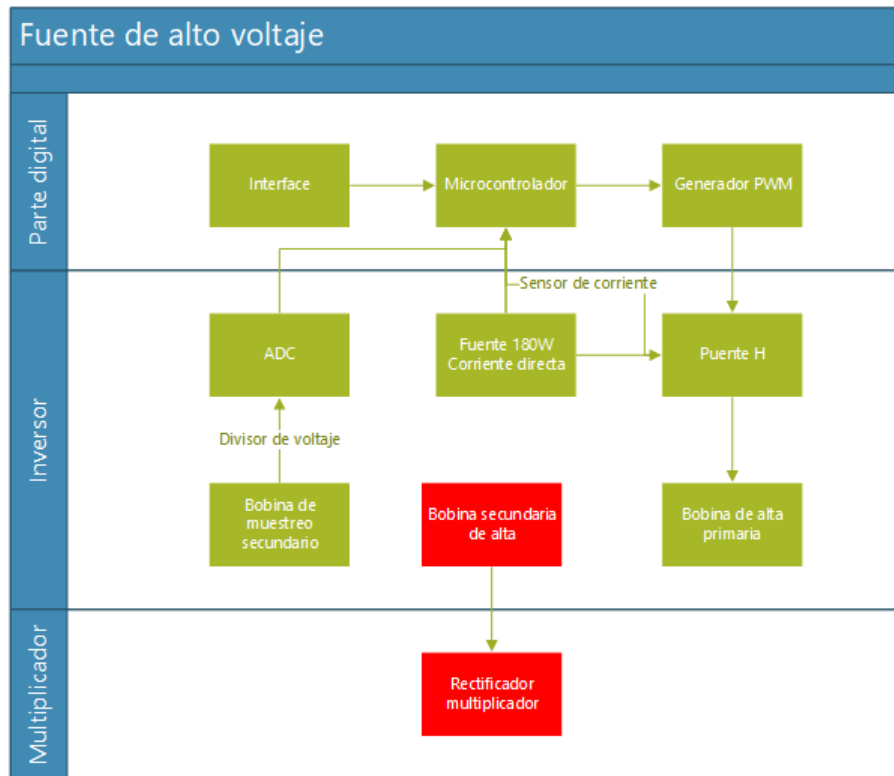


Figura 3.1: Topología de fuente de alto voltaje

3.1.1. Hardware de interface

Para el desarrollo de la interface gráfica se a utilizado un microcontrolador AT-MEGA2560, implementado por la facilidad de programación y los tiempos cortos para la conclusión de este proyecto, así como también la implementación de una pantalla TFT-LCD (Pantalla de cristal líquido de transistores de película fina) y comunicación UART como interfaces gráfica al usuario. Se ha utilizado el hardware de dicha placa y ahorrado tiempo de desarrollo.

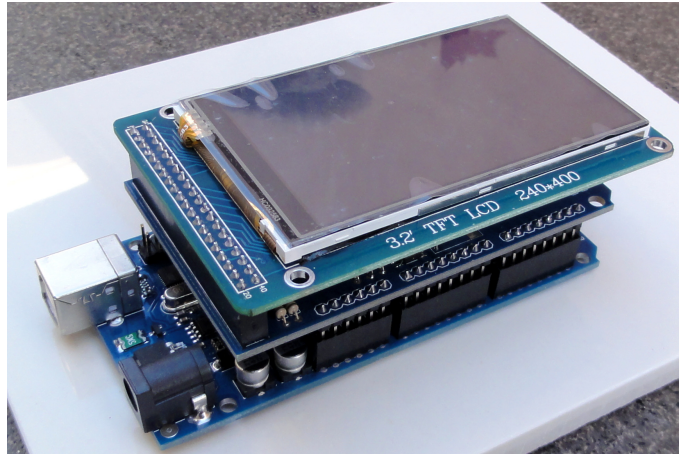


Figura 3.2: LCD-TFT para interface gráfica

3.1.2. Hardware de fuente de voltaje 180w

Esta sección consiste en varias etapas de desarrollo, para ello primero se ha desarrollado una fuente de voltaje de 180W, que es el primer circuito a analizar. Podemos observar en la figura 3.2 el diseño propuesto. El cual esta conformado por el regulador de voltaje LM723 en modalidad fuente de voltaje por modalidad de regulación positiva.

3. METODOLOGÍA

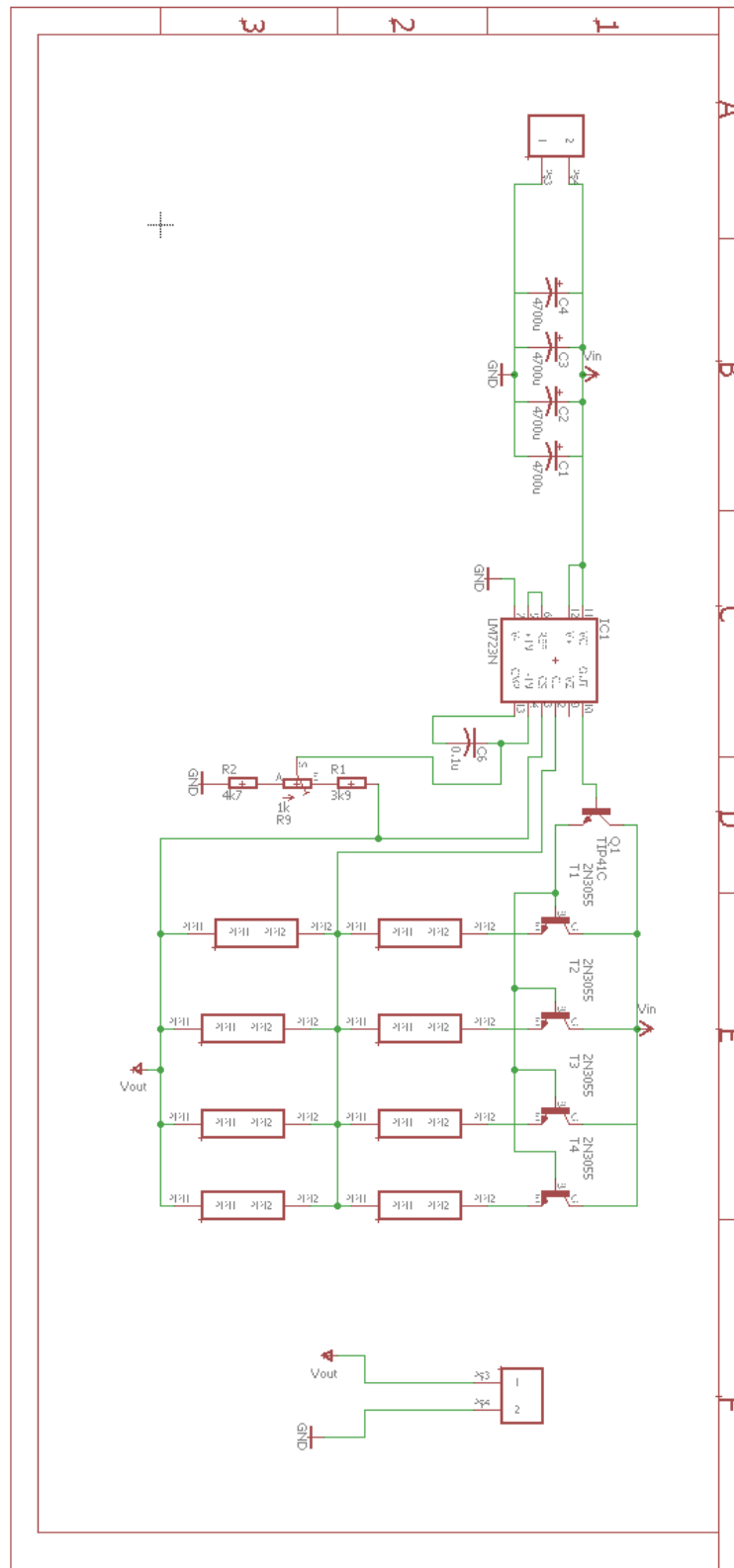


Figura 3.3: Topología de fuente de alto voltaje

3. METODOLOGÍA

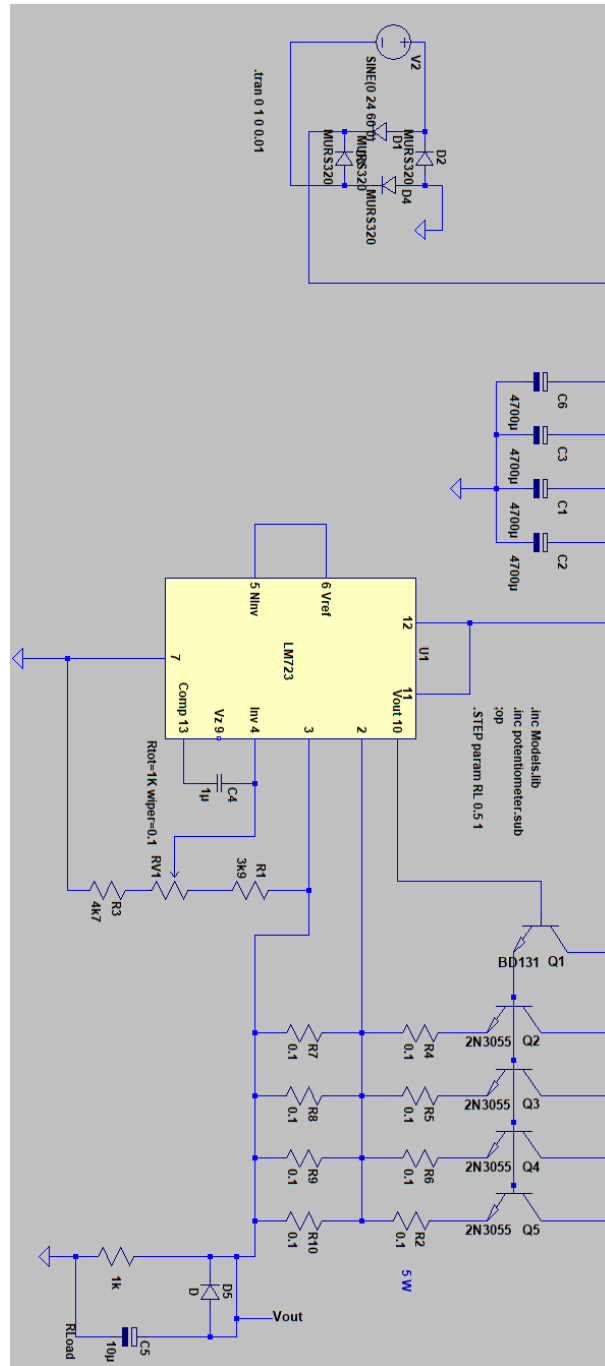


Figura 3.5: Topología de fuente de alto voltaje

3.2. Firmware

3.2.1. Interface gráfica

Para el desarrollo de la interface grafica se ha realizado en el ambiente de programación de Arduino, intentando la utilizacion de la menor cantidad de librerias de autoria no propia y siguiendo algunas reglas de programacion basicas para micro-controladores como lo es la no utilizacion de los comandos delay. Dicho código se divide en varias secciones, para el cual solo se utilizaron las siguientes librerías:

```
#include <UTFT.h>
#include <URTouch.h>
```

En la siguiente figura podemos observar la topologia del firmware que se ha desarrollado.

Todo el código esta dividido en funciones, las cuales llamamos en nuestro LOOP, tratando siempre de cumplir con las siguientes características: no utilización de la función delay, no utilización de ciclos que dependa de alguna condición externa, utilizar el menor código posible para una acción. Las funciones que se utilizaron para la el despliegue de información de la primera pantalla fue el siguiente:

```
void botones1(){
    myGLCD.setFont(BigFont);
    for (x=0; x<3; x++)
    {
        myGLCD.setColor(0, 0, 255);
        myGLCD.fillRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);
        myGLCD.drawRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));
    }
    for (x=0; x<2; x++)
```

3. METODOLOGÍA

```
{
    myGLCD.setColor(0, 0, 255);
    myGLCD.fillRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.drawRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);
}
myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 255);
myGLCD.print("ON 2", 220 , 30);
myGLCD.print("ON 3", 220 , 85);
myGLCD.print("ON 1", 220 , 140);
//myGLCD.print("UART ON", 185 , 195);
myGLCD.print("V SET", 40 , 190);
myGLCD.print("CONFIG", 190 , 190);
}

void marcol(int x1, int y1, int x2, int y2){
    myGLCD.setColor(255, 0, 0);
    myGLCD.drawRect (x1, y1, x2, y2);
    while (myTouch.dataAvailable())
        myTouch.read();
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.drawRect (x1, y1, x2, y2);
}
```

Mediante el código anterior podemos, con ciertas variables, dibujar nuestra área de trabajo en la pantalla, obteniendo como resultado el dibujo de la figura XXX.

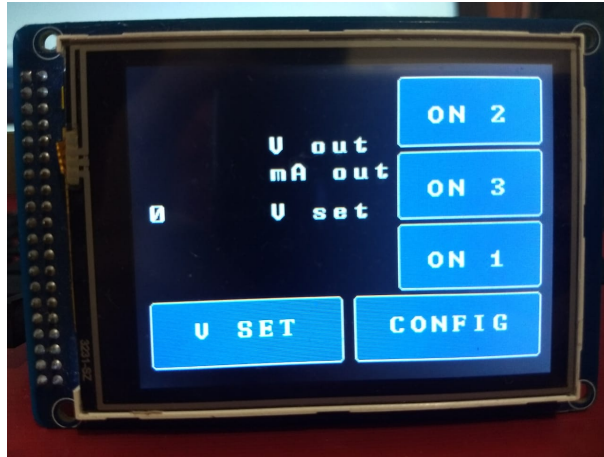


Figura 3.6: Pantalla 1

Mediante esta configuración de dibujo partimos para el código de configuración del TOUCH para lo que llamamos la "pantalla 1".

```
void touch1(){
    myTouch.read();
    x=myTouch.getX();
    y=myTouch.getY();
    if((x>=200) && (x<=310))
    {
        if((y>=10) && (y<=60)){ //boton ON 2
            marco1(200,10,310,60);
        }
        if((y>=65) && (y<=115)){ //boton ON 3
            marco1(200,65,310,115);
        }
        if((y>=120) && (y<=170)){ //boton ON 1
            marco1(200,120,310,170);
        }
    }
    if((y>=175) && (y<=225))
```

3. METODOLOGÍA

```
{  
    if((x>=10) && (x<=155)){ //boton V SET  
        marco1(10,175,155,225);  
        pantalla =2;  
    }  
  
    if((x>=165) && (x<=310)){ //boton config  
        marco1(165,175,310,225);  
    }  
}  
}
```

Observamos que el despliegue de estas funciones solo están conformadas por elementos ifz el llamado a funciones descritas por nosotros se despliegan de la misma manera, resaltando esto debido a que se desarrollo un código lo mas eficientemente posible en cuestión de tiempos de ejecución.

Dividimos el dibujo de la "pantalla 2z las funciones para el touch de la pantalla dos en los siguientes codigos:

Funciones dibujo pantalla 2

```
void botones2(){  
    myGLCD.setBackgroundColor(0,0,255);  
    for (x=0; x<4; x++) //botones +  
    {  
        myGLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myGLCD.fillRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myGLCD.print("+", 27+(x*60), 27);  
    }  
}
```

```
for (x=0; x<4; x++) //botones -
{
    myGLCD.setColor(0, 0, 255);
    myGLCD.fillRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);
    myGLCD.print("-", 27+(x*60), 190);
}

for (x=0; x<4; x++) //blanco
{
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.fillRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);
    myGLCD.setColor(255, 0, 0);
    myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);
    // myGLCD.print(p, 27+(x*60), 170);
}

myGLCD.setColor(0, 0, 255); /// boton set
myGLCD.fillRect(250,70,310,160);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.drawRoundRect(250,70,310,160);
myGLCD.print("set" , 255,105);
}
```

Podemos observar el resultado del dibujo en la figura XXX.



Figura 3.7: Pantalla 2

Funciones TOUCH pantalla 2:

```
void touch2(){
    myTouch.read();
    x=myTouch.getX();
    y=myTouch.getY();

    if((y>=10) && (y<=60)){ ////////////botones +
        if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos
            marco1(10,10,60,60);

            myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
            suma(1,0,0,0,0,0);
        }

        if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena
            marco1(70,10,120,60);
            suma(0,1,0,0,0,0);
        }
    }
}
```

```
}

if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena
    marco1(130,10,180,60);
    suma(0,0,1,0,0,0);
}

if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad
    marco1(190,10,240,60);
    suma(0,0,0,1,0,0);
}
}

if((y>=170) && (y<=220)){ ////////////botones -

if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos
    marco1(10,170,60,220);
    suma(1,0,0,0,0,1);
}

if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena
    marco1(70,170,120,220);
    suma(0,1,0,0,0,1);
}

if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena
    marco1(130,170,180,220);
```

3. METODOLOGÍA

```
        suma(0,0,1,0,0,1);
    }

    if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad
        marco1(190,170,240,220);
        suma(0,0,0,1,0,1);
    }
}

if((x>=250) && (x<=310)){ // boton SET

    if((y>=70) && (y<=160)){
        marco1(250,70,310,160);
        pantalla =1;
        if(vout >=0 && vout <=1000){
            Serial.println(vout);
        }
    }
}
}
```

Una vez que definimos las funciones a utilizar para estas dos primeras pantallas proseguimos a las funciones de cálculos y procesamiento de datos. Para ello hemos creado una funcion capaz de configurar el voltaje de salida, manteniendo una comunicación UART hacia un micro-controlador.

```
void suma(int x1,int x2,int x3,int x4, int k, int w){
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myGLCD.setColor(0, 0, 0);
    myGLCD.setBackColor(255,255,255);
    int q;
    if(x1 == 1){//algoritmo kilos
```



```
    if(w==0 && p<9){
        vout=vout+1000;
        p=p+1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
    if(w==1 && p>0){
        vout=vout-1000;
        p=p-1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);

    }

    myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
}

if(x2 == 1){//algoritmo centena
    if(w==0 && p1<9){
        vout=vout+100;
        p1=p1+1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
    if(w==1 && p1>0){
        vout=vout-100;
        p1=p1-1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);

    }
}
```

3. METODOLOGÍA

```
        myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
    }
    if(x3 == 1){//algoritmo decenas
        if(w==0 && p2<9){
            vout=vout+10;
            p2=p2+1;
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
            sprintf(dato,"%d",q);
        }
        if(w==1 && p2>0){
            vout=vout-10;
            p2=p2-1;
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
            sprintf(dato,"%d",q);

        }
        myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
        //Serial.println(vout);
    }
    if(x4 == 1){//algoritmo unidades
        if(w==0 && p3<9){
            vout=vout+1;
            p3=p3+1;
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
            sprintf(dato,"%d",q);
        }
        if(w==1 && p3>0){
            vout=vout-1;
            p3=p3-1;
```

```
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);

    }
    myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
}

if(k==1){
    for(x=0 ; x<4 ; x++){
        sprintf(dato,"%d",p);
        myGLCD.print(dato,20,90);
        sprintf(dato,"%d",p1);
        myGLCD.print(dato,80,90);
        sprintf(dato,"%d",p2);
        myGLCD.print(dato,140,90);
        sprintf(dato,"%d",p3);
        myGLCD.print(dato,200,90);
    }
}
}
```

Una segunda funcion es la encargada de recibir los datos procedentes del segundo micro-controlador, encargado de leer los datos de sensores y preparar el funcionamiento del inversor.

```
void vinput(){

    str = Serial.readStringUntil('\n');
    for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
    {
        int index = str.indexOf(separator);
```

3. METODOLOGÍA

```
        data[i] = str.substring(0, index).toInt();
        str = str.substring(index + 1);
    }

    for (int i = 0; i < sizeof(data) / sizeof(data[0]); i++)
    {
        Serial.print(data[i]);
        Serial.print('\t');
        Serial.println();

        myGLCD.setFont(BigFont);
        sprintf(vin, "%d", data[0]);
        sprintf(current, "%d", data[1]);
        myGLCD.print("    ", 10, 50);
        myGLCD.print("    ", 10, 70);
        myGLCD.setBackColor(0,0,0);
        myGLCD.setColor(255,255,255);
        myGLCD.print(vin ,10,50);
        myGLCD.print(current ,10,70);
    }
```

Mediante las funciones anteriores podemos mantener una comunicacion INPUT y OUTPUT mediante UART, con el segundo micro-controlador, y mantener un senseo de las variables necesarias para el correcto funcionamiento de la fuente de alto voltaje. Ahora mostramos en cuerpo del programa principal, encargado del control de cada una de las funciones anteriores.

```
void loop(){

//pantalla 1
if(pantalla == 1){
    myGLCD.fillScr(VGA_BLACK);
```

```
    botones1();
    myGLCD.setFont(BigFont);
    char set[25];
    sprintf(set, "%d",vout);
    myGLCD.setBackgroundColor(0,0,0);
    myGLCD.print(set ,10,100);
    myGLCD.print("V set" ,100,100);
    myGLCD.print("V out" ,100,50);
    myGLCD.print("mA out" ,100,70);
    myGLCD.print(vin ,10,50);
    myGLCD.print(current ,10,70);
    while(true)
    {
        if(myTouch.dataAvailable())touch1();
        if(pantalla == 2 )break;

        if (Serial.available()>0){vinput();}
    }

//pantalla 2
if(pantalla == 2){
    myGLCD.fillScr(VGA_BLACK);

    botones2();

    suma(0,0,0,0,1,0);
    while(true)
```

3. METODOLOGÍA

```
{  
    if(myTouch.dataAvailable())touch2();  
    if(pantalla == 1)break;  
}  
  
}  
  
}
```

Análisis de Resultados

4.1. Resultados

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Capítulo 5

Conclusiones

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Bibliografía

- [1] Línea de luz Sincrotrón en México Acelerador lineal de electrones. <https://www.fis.cinvestav.mx/~sincrotron/downloads/ProyectoLNLS5.pdf> 2
- [2] Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. FUSIÓN NUCLEAR. <http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm> 2
- [3] Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design. <http://electronica.ugr.es/~amroldan/cursos/2014/pcb/modulos/temas/IPC2152.pdf> 7
- [4] Transformadores. Miguel Angel Rodríguez Pozueta Doctor Ingeniero Industrial <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf> 13
- [5] Rectificador de onda completa. Prof. Julima Anato http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Instrumentacion%20I/Documentos/Circuitos_Rectificadores.pdf 13
- [6] Multiplicador de voltaje utilizado en CERN en el año 1964. <http://cds.cern.ch/record/43889>